

# 我が国におけるケプラーの第3法則の受容 (V)

Adoption of the Kepler's Third Law in Japan (V)

上原 貞治 S. Uehara

(茨城県つくば市)

東亜天文学会「天界」2007年7月号掲載

## 1. 渋川景佑と「新法曆書続編」

18世紀の終わり頃、ケプラーの第3法則は麻田剛立（1734-1799）と志筑忠雄（1760-1806）の努力によって日本人に知られるところとなった。当時の日本にあった和書や漢籍にこの法則は載っていなかったため、麻田はこれを独自に発見し、志筑はこれをオランダ語の書物（蘭書）から学んだと考えられる（文献1-4）。彼らが次に気にしたことは、この精妙な法則の起源であった。志筑は彼の著書「曆象新書」（1798-1803）にその起源も含めてこの法則を紹介した。一方、麻田一門の曆学者や幕府天文方の精鋭をもってしてもこの法則の正しい理解には相当手間取り、結局は渋川景佑らがラランデ曆書を十分に解読できるまでの時間を要した（文献5）。

前稿（文献4）で、志筑忠雄の「曆象新書」と帆足萬里（1778-1852）の「窮理通」のそれぞれにおけるケプラーの第3法則の導出を紹介した。本稿では、この法則の最終的な理解に至ったと考えられる幕府天文方の渋川景佑（1787-1856）らの著書「新法曆書続編」（1846）にあるケプラーの第3法則とニュートンの万有引力の法則（逆2乗法則）の関係の証明を紹介し、この一連の議論の締めくくりをしたい。

渋川景佑は、高橋至時の次男で（\*注1）、父の遺志を継いでラランデ曆書をもとに西洋の近代天文学を応用した天保の改暦（1844）を成し遂げたが、その曆法を記述するだけでは満足せず、その基礎となる数学、力学を「新法曆書続編」にまとめた。曆算の手順書である「新巧曆書」の他にその基礎となる理論を別の書物にまとめたことは、渋川の近代的センスとなみなみならぬ意志を感じさせる。

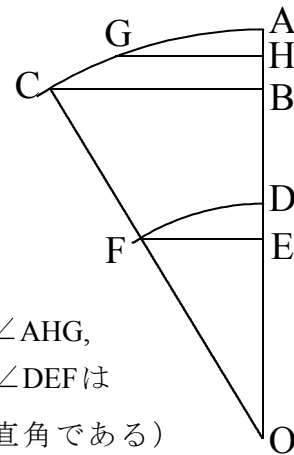
\*注1: 高橋至時の長男の高橋景保（1785-1829）も幕府天文方で、間重富らとともに

にラランデ暦書の解説や日本周辺の地図の作製に従事したが、後者の仕事に絡んでシーボルト事件で罪に問われ獄死した。

## 2. 「新法暦書続編」に見るケプラーの第3法則の根拠

ここで、「新法暦書続編」第三十巻にあるケプラーの第3法則についての証明を紹介する。実際には、ケプラーの第3法則からニュートンの引力の逆2乗則を導くかたちが取られているが、証明の最後の部分の論理を逆にすれば、ケプラーの第3法則を導く志筑の暦象新書とよく似た展開になる。しかし、以下に見る通り、暦象新書の迂遠な証明よりずっと簡単でわかりやすい。原文では漢文であるが、ここでは現代的な数学記号を用いてその流れを示す(文献6)。

図において、円弧 AC、円弧 DF は、それぞれ、外側、内側の惑星の軌道を表す。円弧の中心 O は太陽である。ここでは、惑星の軌道を円軌道であるとし、軌道半径をそれぞれ、 $r_2 = AO$ 、 $r_1 = DO$  とする(煩雑を避けるために線分や円弧の長さを示す特別な記号を省略するが、図からわかる通り AH, DE など線分の長さ、AC, DFなどは円弧の長さであると理解されたい)。∠AOC は無限に小さい角度であるとする。



(注: ∠AHG, ∠ABC, ∠DEF はすべて直角である)

同じ時刻に2惑星が太陽から見てちょうど同じ方向、すなわち、それぞれ D と A にあったとする。内側の惑星ほど公転の角速度が大きいため、内側の惑星が D から F まで進む時間に、外側の惑星は A から C まで進むことはできない。仮に G までしか進めなかったとする。このとき、AH と DE は、それぞれの惑星の同じ時間における太陽方向への「落下距離」と見なせる。その距離は太陽の引力に比例するはずであるから(\*注2)、内側と外側の惑星に働く太陽の引力をそれぞれ  $f_1$ 、 $f_2$  とすると、 $f_1:f_2 = DE:AH$ 。  
∠AOC が小さければ、円弧は2次曲線なので、 $(AC)^2/AB = (AG)^2/AH$  が近似的に成り立つ。惑星の公転周期 P の比は、 $P_2:P_1 = AC:AG$  であるから、周期の比の2乗に対して、

$$P_2^2:P_1^2 = (AC)^2:(AG)^2 = AB:AH \quad \text{---- (1)}$$

が成り立つ。(1) と  $r_2/r_1 = AB/DE$  から、

$$(P_1^2 r_2)/(P_2^2 r_1) = (AH \cdot AB)/(AB \cdot DE) = AH/DE = f_2/f_1 \quad \text{---- (2)}$$

となる。ここで、ケプラーの第3法則、 $P_2^2/P_1^2 = r_2^3/r_1^3$  を(2)の左辺に代入すると、万有引力の逆2乗則、 $f_2/f_1 = r_2^{-2}/r_1^{-2}$  が得られる。(以上)

また、逆に、逆2乗則を(2)の右辺に代入するとケプラーの第3法則が得られる。この証明はそれほど無駄もなく、引力の効果についても理解しやすいのではないか。この他に、同書は第二十九巻の遠心力の解説のところで難解とされる円運動における中心力の数式化に触れている。そこでは、落下距離  $s$  を力と解釈して、 $s \sim l^2/(2r)$  ( $l$ は移動距離。上の図でいうと  $AH \doteq (AG)^2/(2 \cdot AO)$  の関係に当たる) とする流儀と、等加速度運動をもとに  $s = (1/2)ft^2$  として  $f = v^2/r$  ( $v$ は公転速度) を導く流儀があり、両者で見かけ上、係数2の違いが出てくることを議論している。(現代の流儀は後者で、 $f$ を円運動の中心方向の加速度とする。)

渋川は、志筑のあと40年を経て何とか志筑を上回るレベルにまで理解を深めたといえるであろう。天保改暦の頃、江戸時代の日本における西洋近代科学の理解はその頂上に達しようとしていた。そして、そのあとは、幕末の開国から明治の国を挙げての近代化へと、日本の歴史は、天文学史、科学史をその一部として巻き込んで、怒濤のように流れていくのである

\*注2：正確には、落下距離が比例するのは引力ではなく、引力を惑星の質量で割った値(加速度)であるが、加速度の概念が十分理解されておらず、このへんは多少混同されているようである(文献4参照)。

### 3. ケプラー第3法則に挑んだ日本人たち

ここで、ケプラーの第3法則の受容に関わった日本人の立場について整理しておこう。大きく分けると3種類の日本人がケプラーの第3法則に挑んだことになるだろう。第1は民間の旧来の学者、第2はオランダ語が読める学者(蘭学者)、そして第3は幕府天文方である。彼らの間には、その立場の違いから来る研究の方法論の違いがあった。

旧来の民間の学者は、東洋の学問の延長あるいは発展として、漢籍を読んで西洋天文学を研究した。麻田剛立は三浦梅園の説なども参考にしつつ、こ

の流れでケプラーの第3法則を独立発見した可能性が高い（文献1）。一方、蘭学者は、蘭書に書かれている知識をいち早く吸収し、他の日本人に知らせることを優先した。西洋の近代科学の本質を日本語で紹介するという点では、志筑忠雄が先鞭をとった。また、幕府天文方は、信頼できる公式の暦算法（天体の位置予報）を得ることを優先したので、蘭書を読んでも力学や宇宙論の議論は二の次にせざるをえなかった。それで、公式の書物でケプラーの第3法則が紹介されるのは、かなり遅れをとることになった。

しかし、この3グループの間には人的交流があったこと（\*注3）、志筑ほどの進歩的な学者でさえ東洋哲学の自然観から脱却できなかつたことなどから、彼らの相違点を取り上げるよりも、東洋哲学をバックグラウンドとして宇宙を理解しようとし、そして素直にこの法則の美しさに驚き、その根源を知りたいという素朴な欲求を感じたという、日本人全体としての共通点のほうがより重要であると思われる。

\*注3：麻田剛立の門人の高橋至時は、幕府天文方となり蘭書の研究もした。三浦梅園の孫弟子にあたる帆足万里は、儒学者でありながら蘭書を読み、西洋の諸科学を「窮理通」にまとめた。山片蟠桃は、ケプラーの第3法則には言及していないが、その著書「夢の代」で、麻田の太陽系天体の運動の研究と志筑の「暦象新書」の地動説の部分の引用し、自らの西洋書による天文学の研究を紹介した。

#### 4. ケプラーの第3法則が日本人に与えたもの

最後に、ケプラーの第3法則が日本人に何を与えたかを考えてみたい。私が面白いと思うのは、ケプラーの第3法則を麻田剛立の創見とみていた高橋至時が西洋書にこの法則を見つけたときの驚きの言葉である。高橋は「ラランデ暦書管見」（文献5）で、ケプラーの第3法則と麻田の発見した法則（五星距地之奇法）の符合に対して「奇トイフベシ」と述べている。麻田剛立が本当にケプラーの第3法則を独立に発見したのであるならば、彼ほどの実験センスと計算力のある人が西洋で発見されたのと同じかたちでこの法則を発見できることはむしろ当然のことではないか。高橋はなぜこの符合を「奇」と感じたのであろうか。

天文学の観測の分野で西洋が東洋を凌いでいることは、当時すでに久しく日本でも知られていた。だから、高橋は西洋人がこの法則を知っていたこと自体を「奇」と感じたわけではないだろう。また、彼は麻田の秀才を常々認

めていたから、よもや麻田が西洋人が発見した法則を発見できたところで「奇」と感じるほどのことはあるまい。おそらく、高橋はケプラーの第3法則を「惑星までの距離を計算する方法」と考え、学問の手法が違う西洋と日本で同じ方法論が取られたことを「奇」と思ったか、逆に、同法則をなにか形而上の原理のように捕らえて、自然哲学のベースが違う西洋と日本で同じ原理に到達したことを「奇」と思ったかのどちらかであろう。

しかし、実際には、ケプラーの第3法則は、ただの計算法でもなければ、形而上の原理でもなかった。そうではなく極めて明瞭な現象論的法則であることから、当然のこととして、洋の東西を問わず同じ形で発見されたのである。日本人もいずれはそれに気づくことになったであろう。そして、そのことは、西洋と日本の学問は違うと考えていた日本人にショックと希望の両方を与えたことであろう。

さて、現象論的法則には、それを根拠づけるさらに根源的な法則があるはずである（文献7）。間重富はケプラーの第3法則の起源について考えた。そして、振り子の法則のアナロジーでこの法則を説明しようとした。しかし、振り子の法則とケプラーの第3法則は、いわば同じレベルの現象論的法則であり、どちらかがどちらかの根拠になるようなものではない。それに気づいた間は、今度はこれらの法則を統一し、それらを東洋哲学の「気」の働きや「力のモーメントの釣り合い」を持ち出して説明することを試みた。しかし、自然界のダイナミックスの根源をつかさどる「気」も、力学の原理に近い「力のモーメントの釣り合い」も、どう考えてもニュートンの万有引力の逆2乗則よりも根源的に過ぎた。

蘭書からニュートンの万有引力を学んだ志筑忠雄や渋川景佑は、現象論的法則と根本原理の間に「より根源的な現象論的法則」が存在することを知ることになる。こうして、彼らはニュートンに代表される西洋近代科学の方法論を理解するようになったのではないだろうか。ケプラーの第3法則によって新惑星や彗星の軌道計算が可能になり、万有引力の法則によって惑星系の創生が議論できるようになる。新しい法則の発見は技術の進歩と学問の発展をもたらすのである。このような中間的な法則の存在は、森羅万象を一つの条理で説明しようとした三浦梅園の考えには無いものであったが、帆足萬里はそれが自然現象と宇宙の根本原理を結びつける橋渡しになることを理解したはずである。そして、西洋近代科学の方法論は、日本人にも広く理解されることになるのである。

我が国におけるケプラーの第3法則の歴史は、日本人が独自にそれを発見し、その根拠を考え、物理学にまで範囲を広げて西洋書から学ぼうとした、単純に「受容」とは言えないような、日本天文学史上、きわめてユニークで例外的な事件であった。しかし、日本人が西洋の科学的な方法論に触れ、これを吸収していくという、より大きな歴史の流れの中でこれをみれば、実に典型的な役割を演じた事件であったとも言えるであろう。

訂正：前稿「我が国におけるケプラーの第3法則の受容(IV)」(文献4)の\*注3(243ページ)にある2つの等式で数学シンボルが欠落していました。それらの式は、正しくはそれぞれ、 $\int f dt = \Delta v$ 、 $fP = 2\pi v$ です。お詫びして訂正します。

文献：

- 1) 「我が国におけるケプラーの第3法則の受容 — 麻田剛立の『五星距地之奇法』を中心にして—」上原貞治、天界 Vol. 86, 322-330, 386-390、東亜天文学会、2005.
- 2) 同上(II) — 麻田剛立『五星距地之奇法』と志筑忠雄『暦象新書』の比較—、天界 Vol. 87, 320-328、東亜天文学会、2006.
- 3) 同上(III)、天界 Vol. 88, 67-73、東亜天文学会、2007.
- 4) 同上(IV)、天界 Vol. 88, 238-244、東亜天文学会、2007.
- 5) 「洋学」下、日本思想体系、岩波書店 1972 (高橋至時「ラランデ暦書管見」1803-04(抄) 所収、解説 広瀬秀雄、中山茂).
- 6) 日本科学技術古典籍資料 天文学篇3 (近世歴史資料集成) 浅見 恵、安田 健訳、科学書院、2001 (「続新巧暦書」、「新法暦書続編」1846 所収).
- 7) 「西洋の科学、東洋の科学と日本の科学」(全4回) 上原貞治、銀河鉄道WWW版 第6~9号、西中筋天文同好会、2001-2002. URL=<http://www.dl.dion.ne.jp/~ueharas/seiten/gt6/>, 同/gt7/, 同/gt8/, 同/gt9/.
- 8) 「麻田剛立に関わる彗星の楕円軌道を論じた書簡」上原貞治、天界 Vol. 87, 538-542、東亜天文学会、2006.

付録： 日本におけるケプラーの第3法則 関連年表

西暦	日本年号	
1618		ヨハネス・ケプラー（ドイツ人）、ケプラーの第3法則を発見（オーストリア、リンツ）
1776頃	安永五頃	麻田剛立、歳差の周期に関連する消長法の研究を始める
1778頃	安永七頃	三浦梅園、麻田剛立に地動説について質問。麻田答えられず
1784頃	天明四頃	西村太冲（後の「麻田翁五星距地之奇法」の所持者）、麻田剛立門下に入る
1786	天明六	三浦梅園、惑星運動を論じた「贅語」の草稿を麻田剛立に送る
1786	天明六	麻田剛立、惑星の軌道定数を記載した「五星法」を含む「実験録推歩法」を完成
1787	天明七	高橋至時、間重富、麻田剛立門下に入る
1789	寛政元	三浦梅園没
1789頃	寛政元頃	麻田剛立、五星距地之奇法（ケプラーの第3法則）を独立発見か
1792	寛政三	麻田剛立ら、15恒星の赤経の精密観測
1793頃	寛政五頃	麻田剛立ら、「曆象考成後編」の研究を始める（ケプラーの第1・第2法則）
1796	寛政八	高橋至時、間重富、寛政の改暦なる
1796頃	寛政八頃	間重富、「天行方数諸曜帰一之理」を考案
1797頃	寛政九頃	麻田剛立、「麻田翁五星距地之奇法」成立
1798	寛政十	志筑忠雄、「曆象新書」上編。ケプラーの第3法則を記載
1798頃	寛政十頃	高橋至時、惑星運動の研究。西洋天文学による歳差の起源の考察（「増修消長法」）
1799	寛政十一	西村太冲、京都より加賀藩へ異動
1799	寛政十一	麻田剛立没
1802	享和二	高橋至時、「新修五星法」。西洋書の惑星定数と五星距地之奇法を比較
1802	享和二	志筑忠雄、「曆象新書」中・下編。ケプラーの第3法則の導出、万有引力の法則を記載
1803	享和三	高橋至時、「ラランデ曆書」のケプラーの第3法則と五星距地之奇法の同一性を指摘
1803頃	享和三頃	麻田立達？、「五星距地之奇法」により土星までの実距離を計算（文献8）
1804	享和四	高橋至時、「ラランデ曆書管見」。高橋至時没
1805頃	文化二頃	山片蟠桃、「夢の代」執筆。麻田消長法と太陽系モデルの関係に言及
1805	文化二	間重富、「垂球精義」。ケプラーの第3法則（五星距地之奇法）の根拠を考察
1824	文政七	足立信頭、天王星の観測
1836頃	天保七頃	帆足萬里、「窮理通」。ケプラーの第3法則の紹介とその導出の考察
1836頃	天保七頃	足立信頭、ハレー彗星の軌道を計算
1844	天保十五	渋川景佑ら、天保の改暦
1846	弘化三	渋川景佑ら、「新法曆書続編」。ケプラーの第3法則から万有引力の法則の導出を記載